

1. Campo elétrico



A fotografia mostra um gerador de Wimshurst, inventado na década de 1880. Já no século XVIII existiam máquinas eletrostáticas usadas para gerar cargas eletrostáticas por atrito; a grande inovação de Wimshurst foi a utilização da **indução eletrostática**, permitindo acumular cargas muito mais elevadas por meios mecânicos. Há diversos mecanismos envolvidos no funcionamento do gerador de Wimshurst, que serão estudados nos próximos capítulos: garrafa de Leiden, rigidez dielétrica, etc.

1.1. Cargas eletrostáticas

A acumulação de cargas eletrostáticas é um fenômeno que se manifesta frequentemente na experiência cotidiana, especialmente nos dias em que o ar está mais seco. Um exemplo em que surge esse fenômeno é quando se coloca película aderente de plástico sobre uma tigela e se esfrega o plástico sobre a tigela para que fique colado a esta. A ação de esfregar o plástico origina transferência de cargas elétricas entre o plástico e a tigela, ficando ambos com cargas eletrostáticas que produzem força atrativa. Uma folha de acetato também acumula facilmente cargas eletrostáticas, produzindo força atrativa sobre a folha de papel que se costuma colocar debaixo do acetato. Especialmente no verão, sentem-se por vezes choques elétricos quando se toca um objeto metálico, por exemplo, a porta de um automóvel, ou quando se aperta a mão de outra pessoa. O automóvel ou a outra pessoa têm carga eletrostática e o choque elétrico sentido é devido à passagem de alguma dessa carga através do corpo (corrente elétrica).

Basta usar fita-cola para realizar em casa uma experiência para estudar a transferência de cargas eletrostáticas. Pode ser útil também usar dois lápis ou canetas. Corte aproximadamente 20 cm de fita e cole-a à superfície de uma mesa, deixando uma pequena parte fora da mesa para poder descolar a fita da mesa ficando pendurada livremente no ar (evite que a parte livre toque os dedos ou outros objetos; pode ajudar-se de uma caneta para segurá-la num extremo deixando o outro livre).



Figura 1.1.: Força elétrica repulsiva.

Enquanto descolou a fita da mesa, algumas cargas elétricas foram transferidas entre a cola e a mesa; a fita ficou com carga eletrostática que manterá enquanto não tocar outros objetos. Repita o mesmo procedimento com um segundo pedaço de fita, usando a mesma mesa. Como os materiais são os mesmos nos dois casos, espera-se que as duas fitas tenham o mesmo tipo de carga. Aproxime as duas fitas, sem se tocarem e observe a força repulsiva entre cargas do mesmo tipo (figura 1.1). Aproxime alguma das

duas fitas de outros objetos sem carga, por exemplo as paredes, de forma que o lado que se aproxima do objeto seja sempre o que não tem cola, para evitar que fique colada. Observe que as fitas com carga são atraídas pelos objetos sem carga.

Deite fora a fita já usada e prepare outros dois pedaços de fita, mas desta vez cole um deles na mesa e o outro sobre o primeiro. Esfregue a fita de cima e descole simultaneamente os dois pedaços da mesa e entre si. Como a cola da fita de cima e o lado sem cola da fita de baixo são dois materiais diferentes, uma das duas superfícies passará carga para a outra, ficando as duas fitas com cargas de tipos diferentes (um com falta de carga e o outro com excesso). Neste caso deve observar-se uma força atrativa entre as duas fitas, tal como na figura 1.2, por terem cargas de tipos diferentes (esta parte da experiência é mais difícil, porque se quando a fita é descolada do rolo já tem carga elétrica as duas fitas já têm no início carga do mesmo tipo, tornando mais difícil conseguir que fiquem com cargas diferentes). Observe também que cada uma das fitas, independentemente do tipo de carga que tiver, é atraída por outros objetos sem carga.



Figura 1.2.: Força atrativa entre fitas com cargas de tipos diferentes.

1.2. Estrutura atômica

Toda a matéria é formada por átomos. Cada átomo tem um núcleo muito compacto com dois tipos de partículas, **protões** e **neutrões** (figura 1.3), rodeado por uma **nuvem eletrônica** extensa, formada por outro tipo de partículas muito mais pequenas, os **eletrões**.

Entre dois protões ou dois eletrões atua uma força repulsiva chamada **força elétrica**. Entre um protão e um eletrão atua também uma força elétrica, mas atrativa. A intensidade da força entre dois protões, dois eletrões ou um

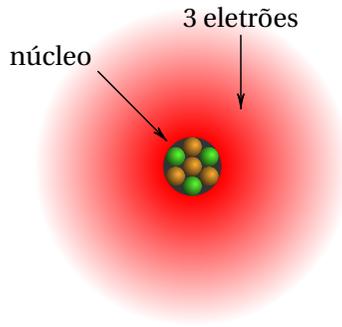


Figura 1.3.: Átomo de lítio com 3 prótons, 4 nêutrons e nuvem de 3 elétrons.

elétron e um próton é a mesma, se a distância entre as partículas é igual nos 3 casos. Nos nêutrons as outras partículas não exercem nunca nenhuma força elétrica.

Conclui-se que existem dois tipos diferentes de carga, a dos prótons e a dos elétrons e que os nêutrons não têm carga.

A força elétrica atua unicamente entre duas partículas com carga; a força é repulsiva, se as cargas das partículas é do mesmo tipo, ou atrativa se são de tipos diferentes.

Um átomo neutro (com igual número de prótons e de elétrons) e não polarizado (nuvem eletrônica com centro no núcleo), não produz forças elétricas sobre outras partículas com carga. Admite-se assim que prótons e elétrons são partículas com cargas elétricas de sinal contrário mas de igual valor absoluto, tendo-se convencionado que os elétrons têm carga negativa e os prótons carga positiva. Um conjunto de partículas tem uma carga total igual à soma algébrica das partículas individuais que a constituem.

A unidade SI usada para medir carga é o **coulomb**, indicado com a letra C. Os prótons têm todos a mesma carga, chamada **carga elementar**, com o seguinte valor:

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (1.1)$$

Os elétrons têm também todos a mesma carga, exatamente igual a $-e$.

1.3. Eletrização

É necessária uma energia muito elevada para conseguir remover um próton, ou um neutrão, do núcleo de um átomo. Isso só acontece no interior das estrelas ou na camada mais externa da atmosfera, onde chocam partículas cósmicas com muita energia, ou nos aceleradores de partículas onde as energias das partículas são suficientemente elevadas. Para extrair um elétron de um átomo neutro é necessária uma energia muito menor, ficando então um **ião** positivo com carga total igual a e . Um átomo neutro pode também atrair um elétron adicional, ficando então um ião negativo com carga total igual a $-e$.

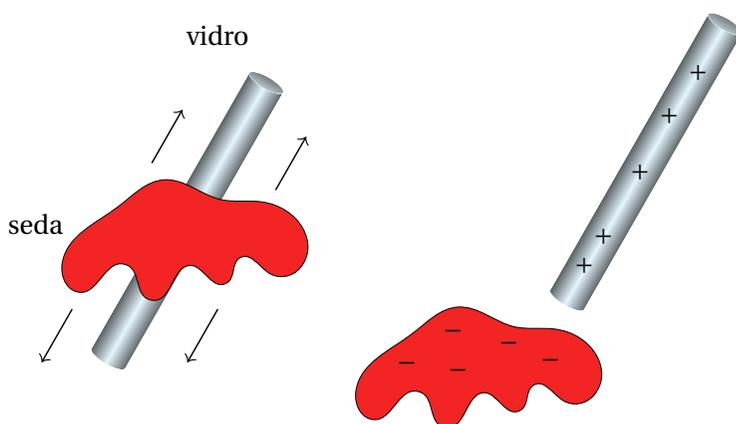


Figura 1.4.: Barra de vidro eletrizada esfregando-a com um pano deseda.

Sempre que dois objetos diferentes entram em contacto próximo, há elétrons de um dos objetos que passam para o outro. O objeto que for mais susceptível de perder elétrons fica então eletrizado com carga positiva (n prótons em excesso) e o objeto que tiver menos tendência para perder os seus elétrons fica com carga igual (em intensidade) mas negativa (n elétrons em excesso), como no caso da figura 1.4.

Nas experiências com fita-cola descritas no início do capítulo, a cola ajuda a que a mesa e a fita entrem em contacto muito próximo, passando elétrons de uma para a outra. Se a mesa e a fita estão inicialmente descarregadas, após a separação entre elas uma fica com carga negativa e a outra com carga positiva da mesma intensidade. A fricção é também usada como método para eletrizar objetos, por facilitar a passagem de elétrons de um

objeto para outro (figura 1.4).

Os diferentes materiais podem ser ordenados numa **série triboelétrica** (tabela 1.1), em que os materiais no topo da série são mais susceptíveis de ficar com carga positiva e os materiais no fim da série têm maior tendência para ficar com carga negativa.

Tabela 1.1.: Série triboelétrica.

Pele de coelho
Vidro
Cabelo humano
Lã
Chumbo
Seda
Alumínio
Papel
Madeira
Cobre
Prata
Borracha
Acetato
Esferovite
Vinil (PVC)

Por exemplo, se uma barra de vidro for esfregada com um pano de seda, a barra fica carregada positivamente e a seda negativamente, porque o vidro está acima da seda, na série triboelétrica (ver figura 1.4). Mas se a mesma barra de vidro for esfregada com uma pele de coelho, a barra fica com carga negativa e a pele com carga positiva, porque a pele de coelho está acima do vidro na série triboelétrica.

1.4. Propriedades da carga

A carga elétrica é uma propriedade intrínseca da matéria, tal como a massa. Uma diferença em relação à massa, é que existem cargas de dois tipos bem como partículas sem carga. Duas propriedades muito importantes da carga elétrica são a sua quantização e a sua conservação.

1.4.1. Quantização da carga

Nos aceleradores de partículas são produzidas colisões entre partículas com energias muito elevadas, que dão origem a muitas outras novas partículas, diferentes dos elétrons, prótons e nêutrons. Todas as partículas elementares conhecidas têm sempre uma carga que é um múltiplo inteiro da carga elementar e (1.602×10^{-19} C). Assim, a carga de qualquer objeto é sempre um múltiplo inteiro da carga elementar.

Nas experiências de eletrostática, as cargas produzidas correspondem normalmente a um número muito elevado de cargas elementares. Nesse caso é boa aproximação admitir que a carga é uma variável contínua e não discreta.

1.4.2. Conservação da carga

Em qualquer processo, a carga total inicial é igual à carga total final. Nos processos de transferência de elétrons entre átomos, esse resultado é óbvio, mas em processos com criação de novas partículas nada indica que tivesse de ser assim. Contudo, em todos os processos observados nos raios cósmicos e nos aceleradores de partículas, há conservação da carga; nos processos em que uma partícula se desintegra dando origem a outras partículas, a soma das cargas de todas as partículas criadas é sempre igual à carga da partícula inicial.

1.5. Força entre cargas pontuais

No século XVIII, Benjamin Franklin descobriu que as cargas elétricas distribuídas na superfície de um objeto metálico podem exercer forças elétricas significativas sobre corpos no exterior do objeto, sem no entanto exercerem qualquer força sobre corpos colocados no interior do mesmo.

No século anterior, já Isaac Newton tinha demonstrado de forma matemática que a força gravítica produzida por uma casca oca é nula no seu interior. Esse resultado é consequência da forma como a força gravítica entre partículas diminui em função do quadrado da distância.

Franklin concluiu então que a força elétrica entre partículas com carga deveria ser também proporcional ao inverso do quadrado da distância entre as partículas. Vários anos após o trabalho de Franklin, Charles Cou-

lomb fez experiências para estudar com precisão a intensidade da força eletrostática entre duas cargas pontuais (uma carga pontual é um objeto muito pequeno com carga elétrica).

A **lei de Coulomb** estabelece que a linha de ação da força elétrica entre duas cargas pontuais q_1 e q_2 é a linha que passa pelos seus centros e a sua intensidade (F) é diretamente proporcional ao valor absoluto de cada uma das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os seus centros:

$$F = \frac{k|q_1||q_2|}{K d^2} \quad (1.2)$$

onde d é a distância entre as cargas (figura 1.5) e q_1 e q_2 são os valores das duas cargas. A **constante de Coulomb** k é uma constante universal com o valor:

$$k = 9.0 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \quad (1.3)$$

As forças elétricas exercidas sobre as duas cargas têm a mesma direção e o mesmo módulo F , mas são em sentidos opostos (forças de ação e reação). Se os sinais das duas cargas são iguais, as forças são repulsivas, como no lado esquerdo da figura 1.5, e os seus sinais são diferentes, as forças são atrativas, como no lado direito da figura 1.5.

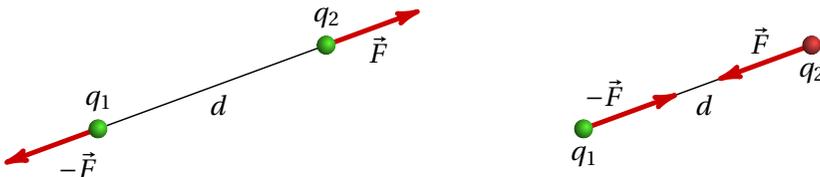
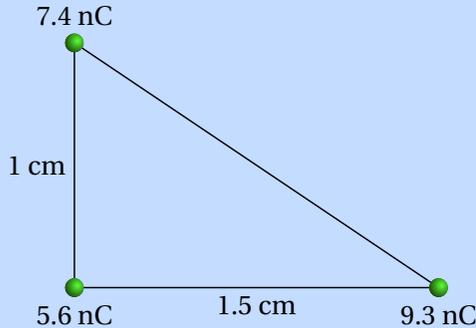


Figura 1.5.: Força elétrica entre duas cargas pontuais, do mesmo sinal (esquerda) ou de sinais diferentes (direita).

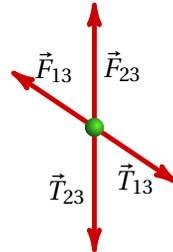
A constante K (que não deve ser confundida com k), sem unidades, é a **constante dielétrica** do meio existente entre as duas cargas. A constante dielétrica do vácuo é 1 e a constante dielétrica do ar tem um valor muito próximo desse, pelo que, se o ar for o meio existente entre as cargas, se pode eliminar K da equação. Meios diferentes do ar têm constantes dielétricas com valores superiores à unidade, pelo que a força elétrica entre cargas pontuais é menor em meios diferentes do ar.

Exemplo 1.1

Considere três cargas pontuais positivas ligadas por fios que formam um triângulo retângulo, como mostra a figura. (a) Qual a tensão no fio que liga as cargas de 7.4 nC e 9.3 nC? (b) Se a carga de 5.6 nC fosse retirada, a tensão calculada na alínea *a* aumentava ou diminuía?



Resolução. (a) O diagrama de forças sobre a partícula de carga 7.4 nC (designada de partícula número 3) é apresentado na figura à direita, onde \vec{F}_{13} e \vec{F}_{23} são as forças eletrostáticas produzidas pelas partículas 1 e 2, de cargas 9.3 nC e 5.6 nC respectivamente, e \vec{T}_{13} e \vec{T}_{23} são as tensões nos fios que ligam a partícula 3 a essas duas cargas. Para que a partícula permaneça em equilíbrio é necessário que:



$$F_{13} = T_{13} \quad F_{23} = T_{23}$$

Antes de fazer contas, é conveniente escrever o valor da constante k nas unidades usadas no problema (nC e cm):

$$k = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} = 9 \times 10^9 \frac{10^6 \mu\text{N} \times 10^4 \text{cm}^2}{10^{18} \text{nC}^2} = 90 \frac{\mu\text{N} \cdot \text{cm}^2}{\text{nC}^2}$$

Admitindo que há ar à volta das cargas, a tensão no fio que liga as cargas 1 e 3 é:

$$T_{13} = F_{13} = \frac{k |q_1| |q_3|}{r^2} = \frac{90 \times 7.4 \times 9.3}{1^2 + 1.5^2} \mu\text{N} = 1.9 \text{ mN}$$

(b) O valor da tensão permanecia igual, pois como se mostrou na alínea anterior, neste caso, T_{13} não depende da força F_{23} produzida pela partícula de 5.6 nC.

1.6. Campo elétrico

Uma forma de interpretar a força eletrostática entre duas partículas com carga consiste em admitir que cada carga elétrica cria à sua volta um campo de forças que atua sobre outras partículas com carga. Se colocarmos uma partícula com carga q_0 num ponto onde existe um **campo elétrico**, o resultado será uma força elétrica \vec{F} sobre a partícula; o campo elétrico \vec{E} define-se como a força sobre a partícula, por unidade de carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.4)$$

Como tal, o campo elétrico num ponto é igual à força elétrica que sentiria uma carga unitária positiva colocada nesse ponto.

De forma inversa, sabendo que num ponto existe um campo elétrico \vec{E} , a força elétrica que atua sobre uma partícula com carga q colocada nesse ponto calcula-se multiplicando a carga pelo campo: $\vec{F} = q\vec{E}$. Basta conhecer o campo para calcular a força; não é necessário saber quais as cargas que deram origem a esse campo. Em unidades SI, o campo elétrico mede-se em newton por coulomb (N/C).

Como vimos, a força elétrica produzida por uma carga pontual positiva Q sobre uma segunda carga de prova q_0 positiva é sempre uma força repulsiva, cuja intensidade diminui proporcionalmente com o quadrado da distância. Assim, o campo elétrico produzido por uma carga pontual positiva Q é representado por vetores com direção radial e sentido a afastar-se da carga, como se mostra no lado esquerdo da figura 1.6.

Uma forma mais conveniente de representar esse campo vetorial é através das **linhas de campo**, como no lado direito da figura 1.6. Em cada ponto, a linha de campo que passa por esse ponto aponta na direção do vetor campo elétrico nesse ponto. A intensidade do campo elétrico é maior nas regiões onde as linhas de campo estão mais próximas umas das outras.

Para determinar o valor do campo elétrico produzido pela carga pontual Q num ponto, coloca-se uma carga de prova q_0 nesse ponto, determina-se

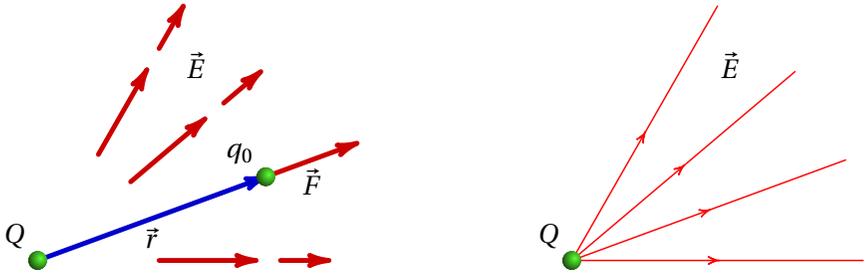


Figura 1.6.: Campo elétrico devido a uma carga pontual positiva Q e representação com linhas de campo.

a força elétrica \vec{F} , e divide-se pela carga q_0 . Usando a lei de Coulomb, obtém-se o seguinte resultado para o módulo do campo elétrico produzido pela carga Q

$$E = \frac{k|Q|}{Kr^2} \quad (1.5)$$

onde r é a distância do ponto à carga Q . O sinal da carga Q indica se o campo é repulsivo ($Q > 0$) ou atrativo ($Q < 0$).

O campo elétrico criado por uma única carga pontual é demasiado fraco para ser observado. Os campos observados experimentalmente são a soma vetorial dos campos criados por muitas cargas pontuais e o campo resultante pode ter linhas de campo curvilíneas como no exemplo da figura 1.7.

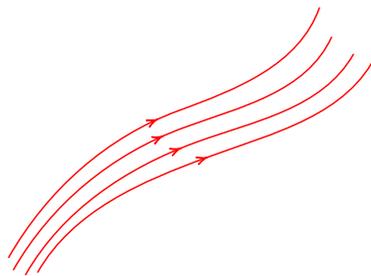


Figura 1.7.: Exemplo de linhas de campo elétrico.

Para calcular o campo elétrico de cargas não pontuais, a região onde existe carga pode ser dividida em muitas regiões infinitesimalmente pequenas, que possam ser consideradas cargas pontuais, e o campo total é a sobreposição dos campos de todas as cargas infinitesimais. A soma dos campos de várias cargas infinitesimais conduz a um integral. O estudo desse método

para calcular campos encontra-se para além dos objetivos deste livro introdutório, mas no apêndice B ilustra-se o cálculo do campo por integração, num caso concreto que será útil num capítulo seguinte.

Exemplo 1.2

Num certo ponto, a força sobre uma carga de prova de 5 nC é de 2×10^{-4} N e tem a direção e sentido do eixo dos x . Calcule o campo elétrico nesse ponto. Qual seria a força exercida sobre um eletrão nesse mesmo ponto?

Resolução. A partir da força calcula-se o campo:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{2 \times 10^{-4}}{5} \hat{i} \left(\frac{\text{N}}{\text{nC}} \right) = 4 \times 10^4 \hat{i} \left(\frac{\text{N}}{\text{C}} \right)$$

A força elétrica sobre um eletrão nesse ponto seria:

$$\vec{F} = -e \vec{E} = -1.60 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^4 \hat{i} = -6.4 \times 10^{-15} \hat{i} \text{ (N)}$$

1.7. Condutores e isoladores

Em alguns materiais, como nos metais, o eletrão mais externo de alguns átomos consegue libertar-se do átomo e deslocar-se livremente pelo material; existe assim uma "nuvem" densa de eletrões livres (eletrões de condução), com densidade constante se o material for homogêneo. Esse tipo de material é designado de **condutor**. Um material que não seja condutor diz-se **isolador**; dentro de um isolador, as cargas elétricas não se podem deslocar livremente.

Se um condutor é colocado numa região onde existe campo elétrico, como a nuvem eletrónica de condução tem carga negativa, desloca-se no sentido oposto às linhas de campo. O deslocamento dos eletrões de condução faz surgir carga negativa num extremo (excesso de eletrões) e carga positiva no extremo oposto (falta de eletrões). Se a carga total do condutor é nula, o valor absoluto dessas cargas nos extremos será igual. Essas cargas de sinais opostos nos extremos opostos do condutor produzem um campo elétrico interno, no sentido oposto ao campo externo e quando as cargas acumuladas nos extremos sejam suficientemente elevadas, dentro do condutor os dois campos se anulam e o movimento dos eletrões de condução cessa.

A figura 1.8 mostra uma barra com carga positiva, colocada na proximidade de uma esfera condutora montada num suporte isolador; a nuvem eletrônica de condução na esfera aproxima-se da barra, deixando carga positiva na região mais afastada da barra e a mesma quantidade de carga negativa na região mais próxima da barra. Se o suporte não fosse isolador, entravam no condutor elétrons do suporte e as cargas positivas indicadas na figura desapareciam.

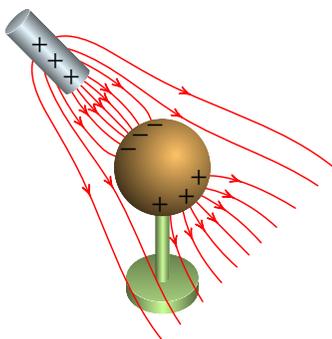


Figura 1.8.: Efeito de uma barra com carga sobre uma esfera condutora.

Se a barra tivesse carga negativa, em vez de positiva, as posições das cargas positivas e negativas na esfera seriam trocadas. Uma vez acumuladas cargas de sinais opostos nos extremos da esfera, o campo elétrico total dentro da esfera é nulo; como tal, as linhas de campo não penetram na esfera e os elétrons de condução dentro da esfera não sentem qualquer força elétrica. Nos dois casos (barra com carga positiva ou negativa), as cargas na superfície da esfera mais próxima da barra são atraídas para a barra e essa atração é maior do que a repulsão sobre as cargas na superfície mais afastada da barra. Como tal, qualquer objeto externo com carga de qualquer sinal produz sempre uma força atrativa nos condutores com carga total nula.

Se a mesma experiência é realizada com uma esfera isoladora (figura 1.9), não há acumulação de cargas nos extremos; consequentemente, o campo no interior da esfera não se anula e todas as moléculas dentro dela são **polarizadas**, nomeadamente, a sua própria nuvem eletrônica desloca-se no seu interior, no sentido oposto do campo. Neste caso (barra com carga positiva), a nuvem eletrônica das moléculas deixa de estar centrada no mesmo ponto das cargas positivas, passando a estar centrada num ponto mais próximo da barra; cada molécula torna-se um pequeno **dipolo elétrico**, que é um sistema com carga total nula, mas com as cargas positivas

e negativas em pontos diferentes.

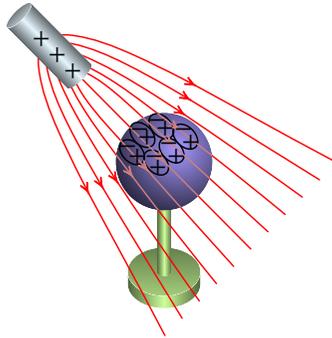


Figura 1.9.: Efeito de uma barra com carga sobre uma esfera isoladora.

A figura 1.9 mostra alguns dipolos dentro da esfera. O lado dos dipolos que está mais próximo da barra tem sempre carga de sinal oposto ao da carga na barra. Consequentemente, a força resultante em cada dipolo é atrativa e a sobreposição de todas essas forças faz com que a esfera seja atraída para a barra. Ou seja, um material isolador sem carga é sempre atraído pelos objetos com carga, independentemente do sinal da carga desses objetos.

1.8. Eletrização por indução

Um método usado para carregar dois condutores isolados, ficando com cargas idênticas mas de sinais opostos, é o método de carga por indução ilustrado na figura 1.10.

Os dois condutores isolados são colocados em contacto e aproxima-se de um deles um objeto carregado, como indicado na figura 1.10. O campo elétrico produzido pelo objeto carregado induz uma carga de sinal oposto no condutor mais próximo e uma carga do mesmo sinal no condutor mais afastado. Em seguida, mantendo o objeto carregado fixo, separam-se os dois condutores. Finalmente, afasta-se o objeto carregado, ficando os dois condutores com cargas opostas (iguais em valor absoluto se nenhuma das esferas tiver carga inicialmente). Em cada condutor as cargas distribuem-se pela superfície, devido à repulsão entre elas, mas as cargas dos dois condutores já não podem recombinar-se por não existir contacto entre eles.

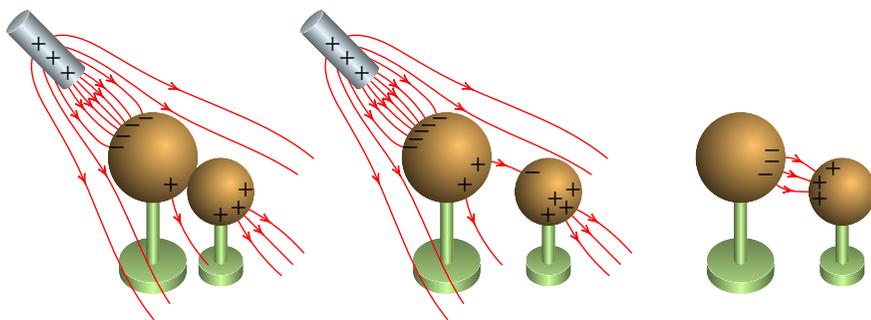


Figura 1.10.: Procedimento usado para carregar dois condutores com cargas iguais mas de sinais opostos.

No gerador de Wimshurst, usa-se esse método para gerar cargas de sinais opostos. Os condutores que entram em contacto são duas pequenas lâminas metálicas diametralmente opostas sobre um disco isolador, quando passam por duas escovas metálicas ligadas a uma barra metálica (figura 1.11). As duas lâminas permanecem em contacto apenas por alguns instantes, devido a que o disco roda.



Figura 1.11.: Gerador de Wimshurst.

Se no momento em que duas das lâminas de um disco entram em contacto uma lâmina do disco oposto estiver carregada, essa carga induzirá cargas de sinais opostos nas duas lâminas que entraram em contacto. Essas cargas opostas induzidas em duas regiões do disco induzem também cargas no disco oposto, porque nesse disco também há uma barra que liga temporariamente as lâminas diametralmente opostas.

Em cada disco, após induzirem cargas no disco oposto, as cargas saltam para dois coletores ligados a duas garrafas metálicas; uma das garrafas armazena carga positiva e a outra carga negativa. Quando as cargas acumuladas nas garrafas forem elevadas produz-se uma descarga elétrica entre as pontas de duas barras ligadas às garrafas, ficando descarregadas. Essa descarga elétrica é um pequeno trovão com uma faísca bastante luminosa.

Os dois discos rodam em sentidos opostos; as escovas que estabelecem o contacto entre lâminas e os dois coletores estão colocados de forma a que na rotação de cada disco, cada lâmina passa primeiro frente à escova, onde troca carga com a lâmina na escova oposta, a seguir passa frente a uma das escovas no disco do outro lado, induzindo cargas nas lâminas do disco oposto e logo passa frente ao coletor, ficando descarregada e pronta para reiniciar o ciclo.

A cada ciclo as cargas induzidas aumentam, porque cada lâmina é induzida pelas cargas de várias lâminas no disco oposto. Para iniciar o processo basta com que uma das lâminas tenha adquirido alguma carga, embora seja muito reduzida, a partir do ar ou pela fricção com as escovas. O sinal dessa carga inicial determina qual das garrafas acumula carga positiva e qual negativa.

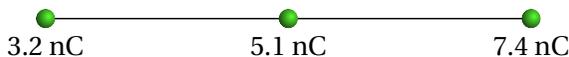
Perguntas

1. Uma barra com carga positiva é colocada perto de uma folha de papel com carga nula. A força que a barra exerce sobre o papel é então:
 - A. Atrativa.
 - B. Repulsiva.
 - C. Nula.
 - D. Atrativa ou repulsiva, conforme a barra seja condutora ou isoladora.
 - E. Atrativa se o papel estiver seco ou nula se estiver húmido.

2. O que distingue um condutor elétrico de um isolador é:
- A. Ter mais eletrões do que protões.
 - B. Ter mais protões do que eletrões.
 - C. Ter mais eletrões do que o isolador.
 - D. Ter moléculas que se deformam mais facilmente.
 - E. Ter algumas partículas com carga livres de se deslocar.
3. Colocam-se três cargas no eixo dos x :
- $q_1 = -6.0 \mu\text{C}$, em $x = -2.0 \text{ m}$,
 $q_2 = +4.0 \mu\text{C}$, em $x = 0$,
 $q_3 = -6.0 \mu\text{C}$, em $x = +2.0 \text{ m}$.
- Determine o módulo da força elétrica resultante sobre q_3 .
- A. $2.4 \times 10^{-2} \text{ N}$
 - B. $1.7 \times 10^{-2} \text{ N}$
 - C. 0
 - D. $2.7 \times 10^{-2} \text{ N}$
 - E. $3.4 \times 10^{-2} \text{ N}$
4. Três esferas idênticas e condutoras, isoladas, uma delas com carga Q e as outras duas sem carga, colocam-se em contacto, cada uma delas tocando as outras duas e a seguir separam-se. Qual das seguintes afirmações é correta?
- A. Todas as esferas ficam sem carga.
 - B. Cada uma delas fica com carga Q .
 - C. Duas delas ficam com carga $Q/2$ e outra com carga $-Q/2$.
 - D. Cada uma delas fica com carga $Q/3$.
 - E. Uma delas fica com carga Q e outra com carga $-Q$.
5. Uma esfera metálica montada num suporte isolador liga-se à terra com um fio condutor e a seguir aproxima-se uma barra de plástico com carga positiva. A ligação da esfera à terra é retirada e a seguir afasta-se a barra de plástico. Com que carga fica a esfera metálica?
- A. Nula.
 - B. Positiva.
 - C. Negativa.
 - D. Diferente de zero, mas não é possível saber o sinal.
 - E. Positiva num extremo e negativa no extremo oposto.

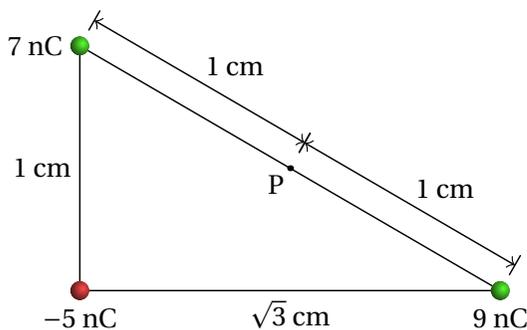
Problemas

1. Uma lâmina de acetato, eletrizada por fricção, coloca-se 1 cm acima de uma mesa onde há vários quadrados de papel, cada um com 0.5 cm de lado. Observa-se que alguns pedaços de papel saltam, ficando colados ao acetato. Faça uma estimativa da ordem de grandeza da carga do acetato, admitindo que uma carga idêntica e de sinal oposto é induzida em cada pedaço de papel e sabendo que o papel usado tem 80 g/m^2 .
2. A soma dos valores de duas cargas pontuais q_1 e q_2 é $q_1 + q_2 = 10 \text{ } \mu\text{C}$. Quando estão afastadas 3 m entre si, o módulo da força exercida por cada uma delas sobre a outra é 24 mN. Determine os valores de q_1 e q_2 , se: (a) Ambas cargas são positivas. (b) Uma das cargas é positiva e a outra negativa.
3. Sabendo que num átomo de hidrogénio a distância entre o próton no núcleo e o eletrão é $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$, determine o módulo do campo elétrico devido ao núcleo, no ponto onde está o eletrão.
4. O campo elétrico na atmosfera terrestre tem intensidade de aproximadamente 150 N/C e aponta na direção e sentido do centro da Terra. Calcule a relação entre o peso de um eletrão e o módulo da força elétrica oposta exercida pelo campo elétrico da atmosfera (a massa do eletrão é $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e admita que a aceleração da gravidade é 9.8 m/s^2).
5. Três cargas pontuais estão ligadas por dois fios isoladores de 2.65 cm cada (ver figura). Calcule a tensão em cada fio.

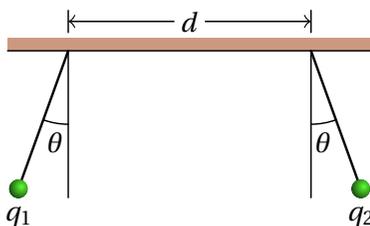


6. Entre duas placas paralelas de cargas opostas existe um campo elétrico uniforme. Um eletrão libertado na superfície da placa carregada negativamente é acelerado uniformemente, a partir do repouso, em direção à placa carregada positivamente (o peso do eletrão pode ser desprezado em comparação com a força elétrica e admite-se que as placas se encontram dentro de um tubo sob vácuo). Sabendo que a distância entre as placas é de 2.0 cm e que o eletrão demora $15 \text{ } \mu\text{s}$ até bater na outra placa: (a) Determine o módulo do campo elétrico (a massa do eletrão é $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$). (b) Qual a velocidade com que o eletrão atinge a placa positiva?

7. Um sistema de três cargas pontuais está em equilíbrio (a força eletrostática resultante sobre cada carga é nula). Se os valores de duas das cargas são q e $2q$, separadas por uma distância d , determine o valor e a posição da terceira carga.
8. Determine a força elétrica resultante sobre cada uma das cargas representadas na figura e o campo elétrico produzido pelas 3 cargas no ponto P.



9. Duas pequenas esferas condutoras, com cargas $q_1 = +300 \text{ nC}$ e $q_2 = +500 \text{ nC}$, e com a mesma massa m , são coladas a dois fios, cada um com 8 cm de comprimento. Os fios são logo colados numa barra horizontal, em dois pontos a uma distância $d = 15 \text{ cm}$ entre si. A repulsão eletrostática entre as cargas faz com que os dois fios se inclinem um ângulo $\theta = 10^\circ$ em relação à vertical. Determine o valor da massa m .



Respostas

Perguntas: 1. A. 2. E. 3. E. 4. D. 5. C.

Problemas

1. Ordem de grandeza de 10^{-10} C.
2. (a) $6 \mu\text{C}$, e $4 \mu\text{C}$ (b) $12 \mu\text{C}$, e $-2 \mu\text{C}$.
3. 5.1×10^{11} N/C.
4. A força eletrostática é 2.7×10^{12} vezes maior que o peso.
5. A tensão no fio do lado esquerdo é $285 \mu\text{N}$ e no fio do lado direito $560 \mu\text{N}$.
6. (a) 1.01×10^{-3} N/C (b) 2.67×10^3 m/s.
7. A terceira carga é $-0.343 q$ e encontra-se entre as outras duas cargas, a uma distância $0.414 d$ da carga q .
8. Com origem na carga $q_1 = -5$ nC, eixo dos x na direção de $q_2 = 9$ nC, e eixo dos y na direção de $q_3 = 7$ nC, as forças são:
 $\vec{F}_1 = (1.35 \hat{i} + 3.15 \hat{j})$ mN $\vec{F}_2 = (-0.12 \hat{i} - 0.71 \hat{j})$ mN
 $\vec{F}_3 = (-1.23 \hat{i} - 2.44 \hat{j})$ mN
O campo em P é: $(-0.545 \hat{i} - 0.135 \hat{j})$ N/ μC
9. 24.7 g.